

Universidade Estadual do Maranhão
Centro de Ciências Tecnológicas
Departamento de Engenharia Mecânica e Produção

FLAIANNY BASTOS PACHECO

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO
SISTEMA PROPULSOR DE QUADRICÓPTERO
PARA OBTENÇÃO DE CRITÉRIO DE
DESEMPENHO DE VOO**

São Luís
2017

FLAIANNY BASTOS PACHECO

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO
SISTEMA PROPULSOR DE QUADRICÓPTERO
PARA OBTENÇÃO DE CRITÉRIO DE
DESEMPENHO DE VOO**

Monografia apresentada à Universidade
Estadual do Maranhão, como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

**São Luís
2017**

Pacheco, Flaianny Bastos.

Análise e simulação computacional do sistema propulsor de quadricóptero para obtenção de critério de desempenho / Flaianny Bastos Pacheco. – São Luís, 2017.

41.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Denner Robert Rodrigues Guilhon.

1. Quadricóptero. 2. Torque. 3. Empuxo. 4. Simulação. I. Título.

CDU 681.5:629.73

FLAIANNY BASTOS PACHECO

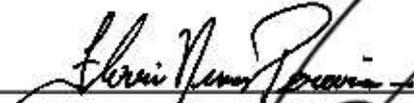
ANÁLISE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO
SISTEMA PROPULSOR DE QUADRICÓPTERO PARA
OBTENÇÃO DE CRITÉRIO DE DESEMPENHO DE VOO

Monografia apresentada à Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

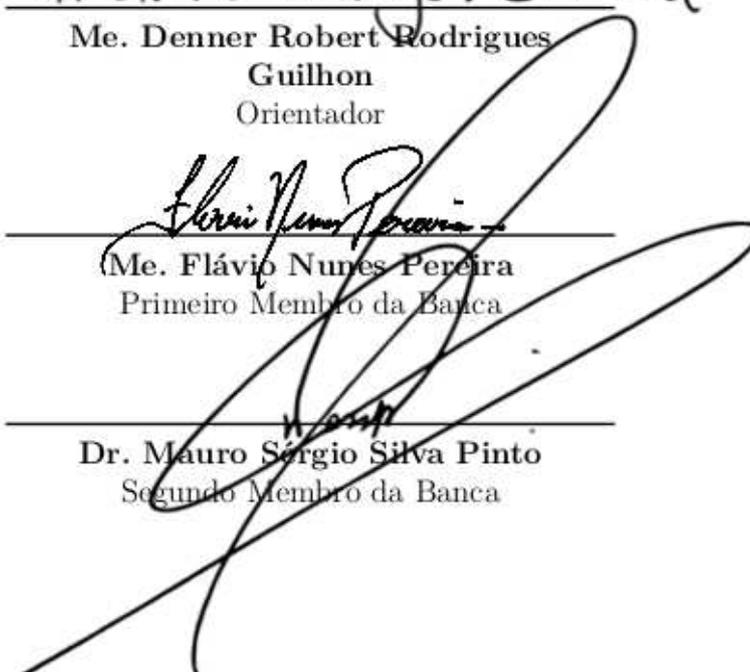
Trabalho aprovado. São Luís, 01 de dezembro de 2017:



Me. Denner Robert Rodrigues
Guilhon
Orientador



Me. Flávio Nunes Pereira
Primeiro Membro da Banca



Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto
Segundo Membro da Banca

Dedico esse trabalho à minha família, amigos, colegas e conhecidos que de alguma maneira contribuíram para o meu crescimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir continuar saudável durante todo esse tempo e não desistir.

À minha família por sempre me apoiar. À minha avó Maria de Fátima, à minha mãe Sandra e ao meu pai Flávio por todo amor e cuidados a mim dedicados para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço aos meus amigos que permaneceram ao meu lado, me suportaram e com quem compartilhei momentos de alegria, momentos não tão alegres assim, que me impulsionaram e me acompanharam ao buscar novos desafios, vocês realmente são “power”.

Agradeço a Equipe de Eficácia Energética Coyote, onde aprendi e pude amadurecer trabalhando em equipe. Ao Núcleo de Automação e Controle - N AuCo, por me proporcionar estrutura para me desenvolver academicamente e a todos os colegas com quem pude conviver.

Aos professores que fizeram parte da graduação, em especial ao meu professor orientador Denner Guilhon, que acreditou no meu potencial, me acolheu, incentivou e esteve sempre presente e disposto a me ajudar.

Continue a nadar
(Dory - Procurando Nemo)

RESUMO

Para avaliar a eficiência de um sistema propulsor de quadricóptero, foram realizados testes em uma bancada experimental, equivalente a 1/4 do *frame* da aeronave, foi utilizado um motor brushless AX-2810Q, hélices de 10x4.5” e 8x4.5” de diâmetro, juntamente com controladores eletrônicos de velocidade de 4A. A fim de obter melhores resultados, estudos preliminares sobre a modelagem matemática foram realizados, o sistema foi baseado no método da alavanca. Os parâmetros obtidos foram o empuxo e o torque, com o objetivo de verificar a influência do diâmetro da hélice na eficácia da aeronave. A bancada foi desenhada utilizando-se o software de modelagem 3D SolidWorks, além dos testes físicos, também foram realizados testes simulados, utilizando a ferramenta de simulação do SolidWork, a fim de validar os resultados obtidos experimentalmente. Através deste, foi possível visualizar o comportamento da estrutura montada de acordo com a variação de empuxos. Foram observadas vibrações na estrutura ao realizar os testes, para verificar a interferência desse fenômeno no sistema, preocupou-se de analisar sua amplitude para avaliar sua interferência.

Palavras-chave: Quadricóptero, torque, empuxo, simulação.

ABSTRACT

To evaluate the efficiency of a quadcopter propulsion system, tests were performed on an experimental bench, equivalent to 1/4 of the aircraft frame, using a AX-2810Q brushless motor, 10x4.5" and 8x4.5" propellers, along with 4A ESCs. In order to obtain better results, preliminary studies on mathematical modeling were performed considering the system based on the lever method. The parameters obtained were the thrust and the torque, aiming to evaluate the influence of the propeller diameter over the effectiveness of the aircraft. . The bench was designed using SolidWorks 3D design software. Additionally to the physical tests, simulated tests were performed using the SolidWorks simulation tool to validate the results obtained experimentally. The employment of that tool made possible to visualize the behavior of the assembled structure according to the buoyancy variation. During the tests, vibrations observed in the structure, concerned to analyze their amplitude in order to evaluate their interference.

Keywords: Quadcopter, torque, thrust, simulação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Disposição dos rotores (a) em X, (b) em +, (c) em Y e (d) em H. Fonte: (RIBEIRO,).	19
Figura 2 – Draganflyer da RC Toys. Fonte:(COSTA, 2008).	20
Figura 3 – Exemplos de configurações de VANTs de asa fixa. Fonte:(ALVES et al., 2012).	21
Figura 4 – Exemplos de configurações de VANTs de asa rotativa. Fonte:(ALVES et al., 2012).	21
Figura 5 – <i>Breguet-Richet Quad-Rotor Helicopter</i> . Fonte:(BARROS, 2014).	22
Figura 6 – Quadrirrotor de Etienne Oemichen. Fonte:(COSTA, 2008).	22
Figura 7 – Quadricóptero utilizado para monitoramento de plantação. Fonte:(FRACARO et al., 2017).	23
Figura 8 – Quadricóptero utilizado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro nas operações de salvamento. Fonte:(CBMERJ, 2016).	24
Figura 9 – Quadricóptero para construção civil. Fonte:(MATTIELLO, 2014).	24
Figura 10 – Motor <i>brushless</i> AX-2810Q utilizado nos testes.	26
Figura 11 – Equilíbrio entre a força de sustentação gerada pelas hélices e a gravitacional. Fonte: (BARROS, 2014).	27
Figura 12 – Descrição das rotações dos propulsores e dinâmica de movimentação de um quadricóptero. Fonte: (BARROS, 2014).	28
Figura 13 – Hélices de 10x4.5” (superior) e 8x4.5” (inferior) utilizadas nos testes da bancada.	28
Figura 14 – ESC utilizado na realização dos testes na bancada.	29
Figura 15 – Bateria Zippy Compact utilizada na bancada de testes.	29
Figura 16 – Ilustração da montagem da bancada experimental no <i>SolidWorks</i> , a mesa está fora de escala, sendo considerado apenas como ponto de apoio fixo.	31
Figura 17 – Montagem da bancada de teste.	31
Figura 18 – Representação da bancada no <i>SolidWorks</i> . (a) Vista frontal do Modelo 3D da bancada de teste; (b) Vista lateral do Modelo 3D da bancada de teste.	32
Figura 19 – Representação da bancada no <i>Simscape</i>	33
Figura 20 – Gráfico comparativo entre os torque gerados pelas hélices 10x4.5” e 8x4.5”.	36
Figura 21 – Gráfico comparativo entre as rotações por minuto das hélices 10x4.5” e 8x4.5”.	36
Figura 22 – Gráfico comparativo entre os torques gerados pelas hélices 10x4.5” e 8x4.5” obtido no <i>Simscape</i>	37

Figura 23 – Resultado da Simulação da Vibração no *SolidWorks* para o torque máximo: (a) da hélice 8x4.5". (b) da hélice 10x4.5". 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Materiais Utilizados	25
Tabela 2 – Dados dos Testes Realizados com a Hélice 8x4.5”	35
Tabela 3 – Dados dos Testes Realizados com a Hélice 10x4.5”	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEC	<i>Battery Eliminator Circuit</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CC	Corrente Contínua
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
Li-Po	Lítio-Polímero
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RPM	Rotação por minuto
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos Gerais	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1	Histórico	20
4.2	Aplicações	23
5	MATERIAIS E MÉTODOS	25
5.1	Materiais	25
5.1.1	Estrutura da Bancada	25
5.1.2	Motor <i>Brushless</i>	26
5.1.3	Hélices	26
5.1.4	<i>Electronic Speed Control</i> (ESC)	27
5.1.5	Bateria	29
5.1.6	Softwares de Modelagem 3D e Simulação	29
5.2	Métodos	30
5.3	Experimentos e Cálculos	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem sido impulsionado pelo avanço tecnológico, fazendo com que possam ser utilizados para monitoramento de áreas que ofereçam risco à vida humana, operações militares, captura de imagens, vistorias em linhas de transmissão, entre outros. Os VANTs são veículos aéreos controlados de forma autônoma ou remotamente, geralmente movidos por propulsão elétrica (GÜÇLÜ; ARIKAN, 2012).

Podem ser classificados em asas fixas e asas rotativas, dentre os quais destacam-se os de asa rotativa por possuírem algumas peculiaridades. Podem, por exemplo, realizar pouso e decolagem vertical, também conhecido como VTOL (*Vertical take-off and landing*), sem a necessidade de uma velocidade mínima de voo para planar, como acontece com os VANTs de asa fixa. A vasta aplicabilidade desses veículos impulsionou diversas pesquisas e desenvolvimento de tecnologia na área (COSTA, 2008).

Os quadricópteros possuem maior capacidade de manobra e alcançam lugares de difícil acesso. Por geralmente serem de pequeno porte, tornaram-se populares por serem dinamicamente mais fáceis que os demais VANTs. A estrutura de um quadricóptero é composta por quatro rotores dispostos de maneira simétrica em relação ao centro de gravidade da estrutura. Dois rotores precisam girar no sentido horário e os outros dois no sentido anti-horário, assim anulando o efeito de rotação entre eles e estabilizando o quadricóptero no ar. Isso difere do que acontece quando se utiliza um número ímpar de hélices. Deste modo, o torque de guinada deve ser compensado de uma maneira diferente (BÜCHI, 2016). As principais características que um quadricóptero deve ter são simetria e rigidez da estrutura, para evitar voos instáveis (NAIDOO; STOPFORTH; BRIGHT, 2011). No centro da estrutura fica embarcado a placa controladora, a bateria, os sensores e toda a parte eletrônica que auxiliará no controle do veículo (COSTA, 2008).

Sabe-se que nem todo projeto de engenharia é testado a partir de um protótipo, pois muita das vezes, torna-se inviável fazer protótipos em tamanho real de grandes projetos, ou até mesmo em tamanho reduzido, quando se leva em consideração os custos. Por essas razões, muitos engenheiros costumam modelar, analisar os resultados obtidos por simulação para realizar os projetos.

O *Simulink* é uma ferramenta do MATLAB, na forma de programação em blocos, utilizada para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos de forma flexível, proporcionando praticidade de visualização, alteração de parâmetros e obtenção de resultados. Dentro do *Simulink* é executado o *Simscape*, que dispõe de modelos pré-programados detalhados de sistemas eletromecânicos (GUIMARÃES, 2014).

O estudo das partes que compõem um quadricóptero se faz necessário a fim de garantir um funcionamento correto e eficiente, sendo que o par motor-hélice é um dos fatores que exerce mais influência no desempenho da aeronave (FOUR et al., 2007).

O presente trabalho propõe o estudo do par motor-hélice, analisando empuxo e torque obtidos experimentalmente e comparando com os resultados simulados, utilizando os softwares *SolidWorks* e *Simscape*.

Foi construída uma bancada de testes para que parâmetros como torque e empuxo de hélices de mesmo passo mas com diâmetros diferentes fossem analisadas, utilizando o método da alavanca. A bancada foi desenhada utilizando o software de modelagem 3D *SolidWorks*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

- Construir uma bancada de teste consistindo de 1/4 do sistema propulsor de um quadricóptero para analisar os parâmetros de torque e empuxo gerado por hélices de diâmetros diferentes e confrontar os dados experimentais com os resultados obtidos através de simulação para fins de validação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Construir bancada experimental e coletar dados;
2. Desenhar o modelo da bancada no software de modelagem 3D *SolidWorks*;
3. Aprofundar estudos relacionados a utilização do *Simscape* para engenharia e utilizá-lo para simular as condições dos testes realizados na bancada;
4. Comparar os resultados experimentais com os simulados para validação dos resultados, com base na literatura utilizada.

3 JUSTIFICATIVA

Com o crescente desenvolvimento de VANTs, faz-se necessário o estudo de seu funcionamento, bem como de seus componentes. Com esse trabalho buscamos aprofundar o conhecimento acerca desses tipos de veículos que vem ganhando espaço no mercado. Estima-se que o valor da receita de vendas aumentará de USD\$ 7,098 bilhões, registrados em 2013, para USD\$ 8,351 bilhões até 2018 (OST, 2016).

Há diversos estudos voltados para desenvolvimento de VANTs e estudo dessas aeronaves (OST, 2016). Porém, é importante também dar atenção à estrutura da aeronave; por esse motivo o estudo do sistema propulsor se faz necessário. A construção da bancada e a simulação da mesma auxiliarão na obtenção de parâmetros importantes a serem considerados na construção da aeronave.

Esses tipos de veículos apresentam diversas aplicações, uma das mais importantes é a de poupar a vida humana em atividades que ofereçam risco. Por motivos como esse a construção de uma aeronave desse tipo não é uma tarefa fácil, envolvendo diferentes aspectos tais como *hardware*, *software*, sensores, câmeras, consumo de energia, dentre outros (MALDONADO J. C; BARRETO, 2014). Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas de conhecimento, todas aplicadas à construção de um VANT.

A importância em simular e observar os parâmetros de funcionamento dessas aeronaves ocorre pois ao apresentar mau funcionamento em voo pode colocar vidas em risco, além de gerar prejuízos. A popularização dessa área fez com que esse tipo de tecnologia se tornasse relativamente mais acessível, tanto financeiramente quanto em termos de utilizações para civis. Ao implementar a utilização de *softwares* de simulação para projetar essas aeronaves, é possível aumentar a confiabilidade e diminuir prejuízos com falhas não previstas durante o dimensionamento.

Ao passo que tornam-se populares, abre-se mais possibilidades para aplicações desses veículos, que inicialmente restringiam-se a projetos militares. Pretende-se futuramente utilizar VANTs para transporte de pessoas (OST, 2016), e por conta dessa popularidade pesquisas nessa área tornam-se relevantes.

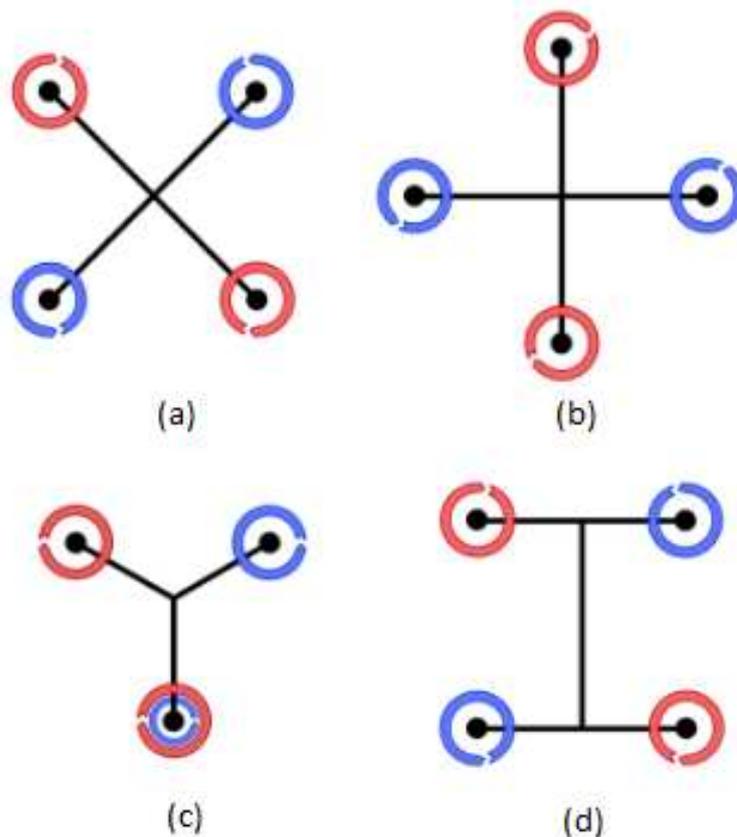
Foram escolhidas para testes hélices de diâmetros diferentes pois trata-se de um dos principais elementos do sistema de propulsão. A base do sistema propulsor é o motor e, geralmente, para esse tipo de aeronave utiliza-se motor *brushless*, que possui diversas vantagens quando comparado ao *brushed*. A hélice deve absorver a força fornecida pelo motor, contudo deve-se atentar que para a utilização de hélices adequadas ao motor do sistema para que não haja vibrações e baixa eficiência (IAC, 2002).

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Os quadricópteros destacam-se dentre os VANTs, por ser uma plataforma bastante flexível no campo da robótica aérea para pesquisa de mobilidade, assim como os robôs com rodas foram utilizados nos anos 90 para o estudo da robótica móvel (OST, 2016). Além de pesquisas na área, realizadas com diferentes finalidades, atualmente há também diversos modelos de quadricópteros sendo comercializados.

Podem assumir diversas configurações em relação a disposição dos motores, sendo em estrutura de “X”, “+”, “Y” e “H”, como mostrado na Figura 1. Para evitar voos instáveis deve-se ter uma estrutura rígida e simétrica, bem como o centro de gravidade deve ser mantido o mais próximo possível do centro da estrutura (NAIDOO; STOPFORTH; BRIGHT, 2011).

Figura 1 – Disposição dos rotores (a) em X, (b) em +, (c) em Y e (d) em H. Fonte: (RIBEIRO,).



Como exemplo dos quadricópteros comercializados tem-se o Draganflyer, mostrado na Figura 2, comercializado pela RC Toys. Muitas universidades utilizam este modelo como base de suas pesquisas. É composto por tubos de fibra de carbono e destaca-se pela

eletrônica existente a bordo, contendo o receptor de comandos do piloto, três giroscópios piezoelétricos, um microcontrolador e quatro sensores infravermelhos que possibilitam que o mesmo se estabilize sozinho (COSTA, 2008).

Figura 2 – Draganflyer da RC Toys. Fonte:(COSTA, 2008).



4.1 HISTÓRICO

Os VANTs surgiram em meados da Primeira Guerra Mundial, contudo eram imprecisos e apresentavam pouca confiabilidade. Após o fim da Primeira Guerra, o desenvolvimento dos VANTs passou por um período de estagnação e os projetos em andamento visavam aplicações exclusivamente militares para fins de reconhecimento, monitoramento e ações ofensivas contra inimigos (OST, 2016).

São classificados segundo sua topologia como aeronaves de asas fixas, asas rotativas, cujo cada classificação apresenta vantagens diferentes em relação a cada aplicação (ALVES et al., 2012). Comparando estes dois tipos de aeronaves, tem-se que a capacidade de manobra do VANTs de asas rotativas é muito maior do que as dos VANTs de asas fixas (SILVA; MORAIS, 2013). Nas Figuras 3 e 4 apresentam exemplos das classificações dos VANTs.

O primeiro quadricóptero foi criado por Charles Richet e pelos irmãos Breguet, em 1907, com o nome *Breguet-Richet Quad-Rotor Helicopter*, apresentada na Figura 5, pesando aproximadamente 578 kg. Mesmo não obtendo resultados satisfatórios, foi a partir desse primeiro experimento que a teoria do par de rotores funcionando em sentidos opostos passou a ser adotada (BARROS, 2014).

Anos mais tarde, Etienne Oemichen criou seu quadricóptero, composto por quatro rotores e oito propulsores, ligados todos ao mesmo motor. Mais de mil testes foram

Figura 3 – Exemplos de configurações de VANTs de asa fixa. Fonte:(ALVES et al., 2012).

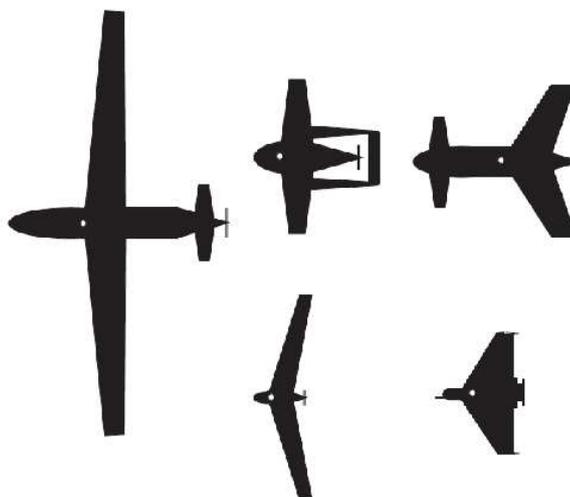


Figura 4 – Exemplos de configurações de VANTs de asa rotativa. Fonte:(ALVES et al., 2012).

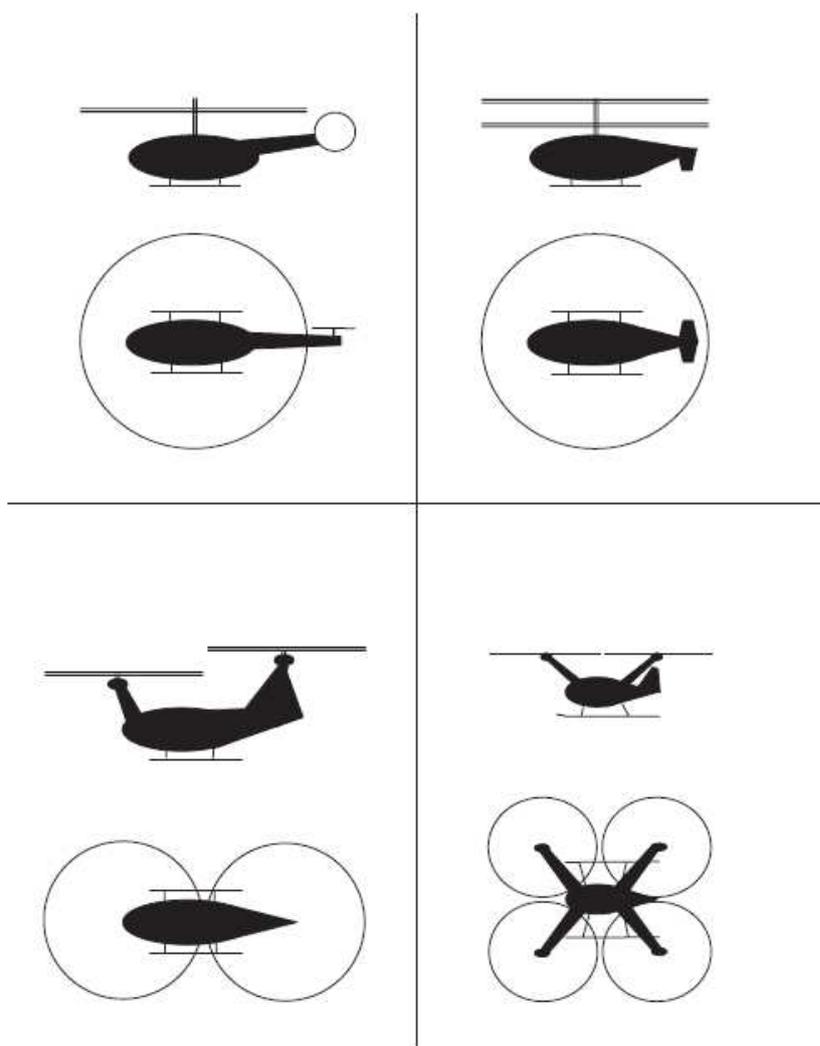
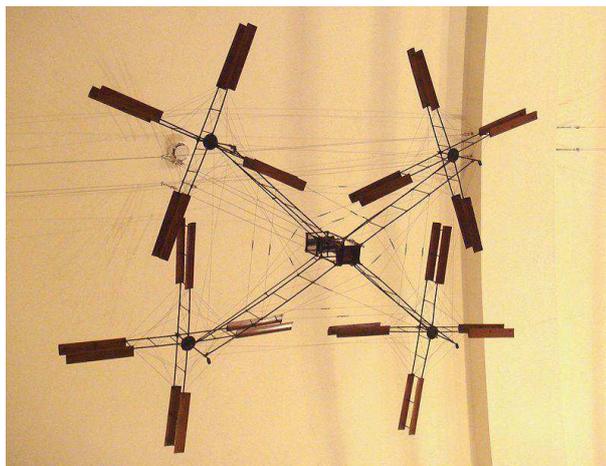
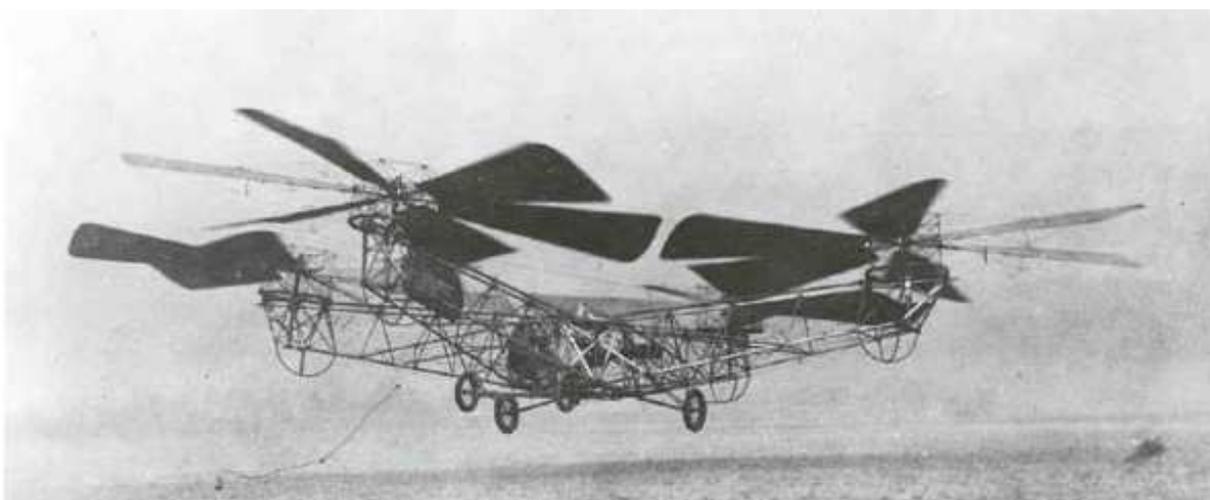


Figura 5 – *Breguet-Richet Quad-Rotor Helicopter*. Fonte:(BARROS, 2014).

realizados durante a década de 1920, em razão de o modelo ter apresentado um considerável grau de liberdade (COSTA, 2008).

Figura 6 – Quadrirrotor de Etienne Oemichen. Fonte:(COSTA, 2008).



O uso deste tipo de aeronave tem sido bastante difundido, e atualmente pode-se observar aplicações militares e civis em diversas áreas, sendo resultado dos avanços tecnológicos que permitiram a miniaturização de dispositivos como giroscópios, acelerômetros, baterias, motores, sensores, entre outros dispositivos que compõem os VANTs (OST, 2016). Essa popularização fez com que a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) editasse em maio de 2017 um regulamento especial com regras gerais para o uso civil de aeronaves não tripuladas a fim de estabelecer requisitos mínimos para operações. As regras são complementares às de outros órgãos que também devem ser consideradas antes de qualquer operação. Para a edição do regulamento especial a ANAC se baseou em normas internacionais, tais como as editadas pela *Federal Aviation Administration* (FAA), *Civil Aviation Safety Authority* (CASA) e *European Aviation Safety Agency* (EASA), autori-

dades aeronáuticas dos Estados Unidos, Austrália e da União Europeia, respectivamente (ANAC, 2017).

4.2 APLICAÇÕES

Como já mencionado anteriormente a dinâmica facilitada dos quadricópteros foi um dos fatores determinantes para impulsionar a utilização em diversas áreas como vigilância costeira, monitoramento e mapeamento de desastres, combate a incêndios, monitoramento de safras, operações de busca, na construção civil, inspecionar e/ou monitorar por meio de imagens aéreas (FRACARO et al., 2017). Na Figura 7 abaixo observa-se a utilização para monitoramento de uma plantação.

Figura 7 – Quadricóptero utilizado para monitoramento de plantação. Fonte:(FRACARO et al., 2017).



Um exemplo recente da utilização de quadricópteros em operações de busca e salvamento foi observado em abril de 2016, no acidente da ciclovía da Avenida Oscar Niemeyer no Rio de Janeiro. O Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro utilizaram um quadricóptero para vasculhar áreas de difícil acesso, como as fendas existentes na encosta da avenida. A corporação também possui outro quadricóptero utilizado pelo Terceiro Grupamento Marítimo para ajudar nos salvamentos. Em caso de afogamento o equipamento localiza a vítima e libera a boia acoplada, enquanto isso os guarda-vidas são acionados para realizar o resgate da pessoa (JORNAL DO BRASIL, 2016)

Pesquisadores do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique desenvolveram um quadricóptero com a finalidade de construção automatizada. O quadricóptero transporta pequenos elementos de construção e os posiciona de acordo com o modelo definido em sua programação (MATTIELLO, 2014). Como mostrado na Figura 9.

Figura 8 – Quadricóptero utilizado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro nas operações de salvamento. Fonte:(CBMERJ, 2016).



Figura 9 – Quadricóptero para construção civil. Fonte:(MATTIELLO, 2014).



5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Para a realização dos testes foram utilizados os materiais listados na Tabela 1, e alguns componentes serão detalhados nesta seção. Para modelagem e simulação da bancada foram utilizados os softwares de modelagem 3D SolidWorks, com o qual foi possível simular a vibração que ocorre na bancada ao atingir o torque máximo.

Tabela 1 – Tabela de Materiais Utilizados

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Motor <i>Brushless</i>	AX-2810Q
Hélices	10x4.5” e 8x4.5”
ESC (<i>Electronic Speed Control</i>)	30A
Bateria Li-Po	25C Series
Arduino	Uno
Jumpers	Tipo fio, macho-macho
Balança Digital	SF-400
Protoboard	170 pontos
Tacômetro Digital	
Tubo Quadrado de Alumínio	6063-T5, 60 cm
Parafuso e Porcas	9mm de diâmetro

Os materiais como Arduino e a balança foram importantes na realização dos testes, pois através do Arduino programou-se o funcionamento do motor. Com a utilização da balança coletou-se os dados de massa para calcular torque e empuxo.

5.1.1 ESTRUTURA DA BANCADA

Os componentes eletrônicos do quadricóptero são montados em sua estrutura, que deve ser rígida e o seu peso deve ser o menor possível, uma vez que a autonomia de um quadricóptero está relacionada ao seu peso. Pensando nisso foi utilizado um tubo quadrado de liga de alumínio 6063-T5, de 0.019 m de lado.

Esse tipo de liga possui alta qualidade de acabamento superficial, oferecendo boa resistência a corrosão e podendo ser facilmente soldada. A nomenclatura T5 é referente a têmpera, tratamento térmico no qual o material é submetido a um resfriamento brusco após um processo conformação a uma temperatura elevada. Apresenta limite de escoamento igual a 110 MPa e limite de resistência igual a 150 MPa (ALCOA, 2010).

A barra utilizada na construção da bancada tem comprimento total de 0.6 m, considerando que a estrutura de um quadricóptero deve ser simétrica, a barra foi fixada a base em sua metade.

5.1.2 MOTOR *BRUSHLESS*

Os motores *brushless*, comumente utilizados nesse tipo de aeronave, são considerados motores síncronos, onde o rotor é constituído de ímãs e o estator é composto por bobinas que irão produzir o campo magnético (ALVES et al., 2012). O motor *brushless* possui mecânica similar ao *brushed* contudo não possui escovas e com isso não possui nenhum ponto de contato para passagem elétrica entre o rotor e o estator, diminuindo a interferência eletromagnética gerada pelo motor.

Este tipo de motor tem se tornado popular por apresentar diversas vantagens como alta potência, eficiência e alto torque, apresentam também vida longa útil, devido ausência de escova (FILHO; RUDIGER; NASCIMENTO, 2011). Há problemas em se regular sua velocidade de rotação, o que acaba por limitar o seu uso. Nos dias atuais, motores CC (corrente contínua) de pequena capacidade são amplamente usados em sistemas de controle automação (XIA, 2012). Os motores *brushless* possuem uma melhor proporção de torque fornecido em relação ao tamanho do motor, o que os torna úteis para aplicações aeroespaciais (GAMAZO-REAL; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ; GÓMEZ-GIL, 2010).

O motor AX-2810Q, mostrado na Figura 10 utilizado no projeto foi projetado para uso exclusivamente em multicopteros. Com a potência de 750KV, é recomendado que sejam utilizados ESCs de 30 ampères e bateria de Li-Po de 3-4 células (BARROS, 2014).

Figura 10 – Motor *brushless* AX-2810Q utilizado nos testes.



5.1.3 HÉLICES

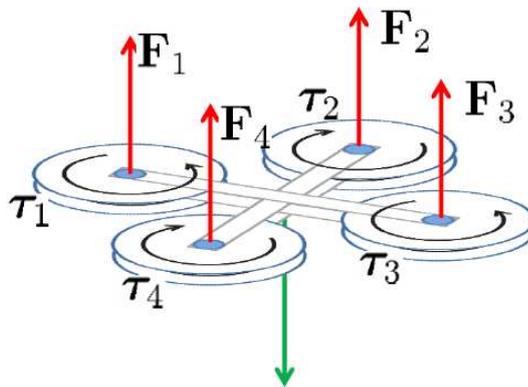
As hélices são responsáveis pela sustentação e tração da aeronave. São constituídas por: cubo, raiz, borda de ataque, borda de fuga e corda. Podem dividir em duas classificações relacionadas o passo: passo fixo e passo variável. As principais características de uma hélice

são diâmetro e passo. O diâmetro descreve o tamanho da hélice de uma ponta a outra e o passo representa a distância teórica percorrida em uma volta (SILVA et al., 2017).

As hélices são responsáveis por converter a rotação do motor em força empuxo, o controle dessa força, nas hélices de passo fixo, se dá através do controle da velocidade de rotação (MARTINEZ-ALVARADO et al., 2013). A potência de empuxo pode ser considerada como resultado do trabalho conjunto do motor e da hélice, e a eficiência da hélice varia de acordo com a velocidade do motor, atitude, altitude, temperatura e velocidade do ar (IAC, 2002).

Entende-se como voo equilibrado quando a força de sustentação gerada pelas hélices é igual à força gravitacional, conforme apresentado na Figura 11, dessa forma ocorre quando o veículo está pairando e todos rotores estão com velocidades iguais (BARROS, 2014). A movimentação do quadricóptero acontece com a diferenciação entre as velocidades dos rotores. Por exemplo, para que a aeronave se mova verticalmente basta o aumento das velocidades, para que se desloque para cima, ou diminuição da velocidade dos motores igualmente, para que se mova para baixo. Na Figura 12 é ilustrado os movimentos que o quadricóptero pode realizar, cujo as setas de maior espessura representam os rotores de maior velocidade (SÁ, 2012).

Figura 11 – Equilíbrio entre a força de sustentação gerada pelas hélices e a gravitacional. Fonte: (BARROS, 2014).



As duas hélices utilizadas nos testes, mostradas na Figura 13 possuem o mesmo passo, igual a 4.5 polegadas, e diâmetros de 10 e 8 polegadas. A escolha das hélices leva em consideração as características do motor selecionado, buscando uma melhor eficiência para o conjunto.

5.1.4 ELECTRONIC SPEED CONTROL (ESC)

ESC é um dispositivo que controla a velocidade do motor *brushless* através da variação da amplitude de sinal de saída. O sinal de controle do ESC é o PWM (*Pulse Width Modulation*), que varia entre dois pontos de tensão, fazendo com que o motor gire

Figura 12 – Descrição das rotações dos propulsores e dinâmica de movimentação de um quadricóptero. Fonte: (BARROS, 2014).

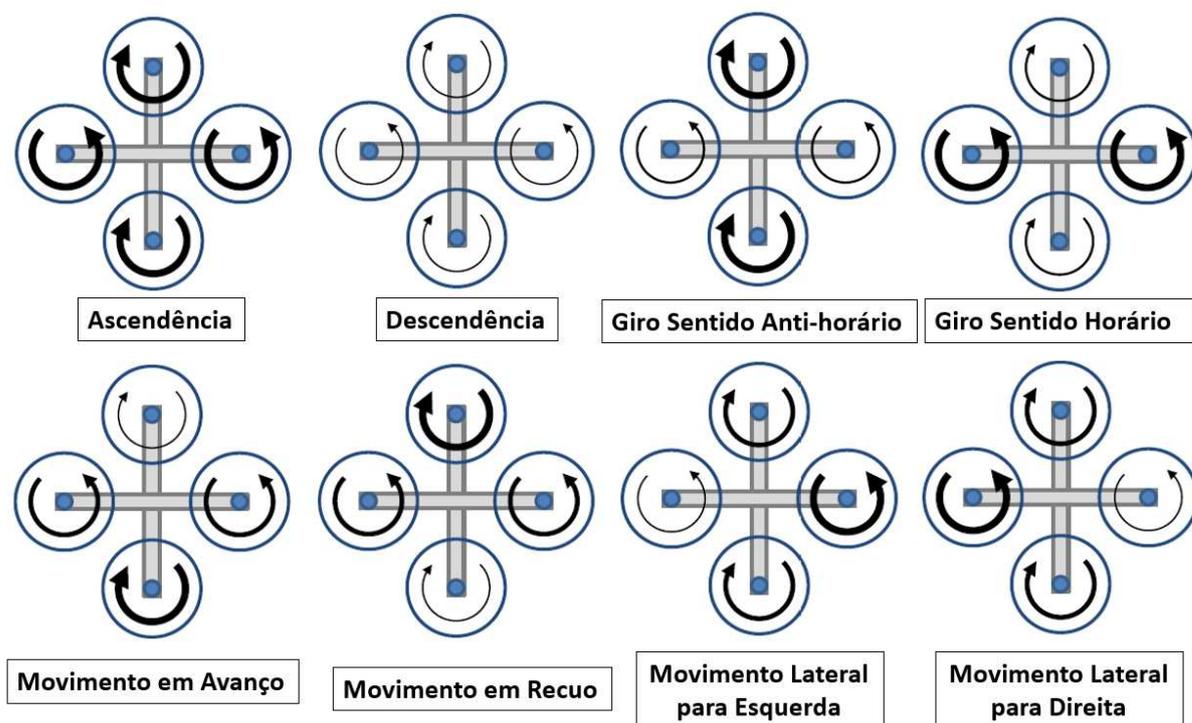


Figura 13 – Hélices de 10x4.5” (superior) e 8x4.5” (inferior) utilizadas nos testes da bancada.



em uma velocidade proporcional à relação entre o intervalo de tempo ligado e o período do pulso (ALVES et al., 2012).

O ESC utilizado, mostrado na Figura 14, da Multistar opera com corrente contínua de até 30 A para baterias de 2 a 4 células. PWM de controle de 8 KHz e sistema BEC (*Battery Eliminator Circuit*), que dispensa o uso de bateria extra para alimentar outros circuitos.

Figura 14 – ESC utilizado na realização dos testes na bancada.



5.1.5 BATERIA

As baterias Lítio-Polímero, ou Li-Po, são comumente utilizadas pois possuem maior capacidade em relação ao peso, outra vantagem é o fato de serem recarregáveis e a maioria das baterias Li-Po usa uma carga rápida para recarregar até 80% da capacidade total (ALVES et al., 2012). São constituídas de células, com tensão nominal de 3.7 Volts, dispostas em série ou em paralelo para aumentar a voltagem ou a carga total disponível, respectivamente. Classificam-se também quanto a capacidade de manter certa corrente em função do tempo (BARROS, 2014).

Quanto maior a capacidade, maior o tempo de voo, contudo o peso da bateria também tende a ser maior. As baterias precisam descarregar correntes elevadas, uma vez que a maioria dos multirrotores consomem altas correntes, por isso deve-se atentar a taxa de descarga das baterias, pois uma taxa alta de descarga pode acarretar em aumento da temperatura, e dependendo do tempo de uso, pode levar a um incêndio (BEZERRA, 2015).

A bateria utilizada no projeto é do modelo Zippy Compact, cuja capacidade de 2700 mAh, taxa de descarga de 25 C, composta por 4 células, mostrada na Figura 15.

Figura 15 – Bateria Zippy Compact utilizada na bancada de testes.



5.1.6 SOFTWARES DE MODELAGEM 3D E SIMULAÇÃO

As ferramentas de simulação e modelagem na engenharia colaboram para o desenvolvimento da visão sistêmica e da prática de pensar estrategicamente (BELHOT,

2001). A utilização de softwares de modelagem 3D facilita não só a visualização de um projeto, mas também sua alteração e compreensão. O *SolidWorks* apresenta além de ferramentas para modelagem 3D, ferramentas de simulação que permitem analisar tensões e deformações de peças e montagens, calcular a distribuição de temperaturas dentro de uma estrutura, calcular fluxo de fluidos e transferência de calor, assim como identificar vibrações e determinar impacto de cargas em estruturas.

As peças foram feitas nas medidas reais e a montagem completa da bancada foi realizada utilizando a ferramenta *Assembly* no *SolidWorks*, cujo foram aplicadas as restrições mecânicas do projeto.

Para simular o funcionamento da bancada, foi utilizado o *Simscape*, que permite criar modelos de sistemas físicos dentro do ambiente *Simulink*/MATLAB. O *Simulink* é uma ferramenta gráfica do MATLAB para simulação de sistemas dinâmicos, como sistemas elétricos, hidráulicos, mecânicos e de controle, através de diagrama de blocos (MATHWORKS, 2017).

O *Simscape Multibody Link* é um *plug-in* que permite que o projeto no *SolidWorks* seja exportado como um arquivo XML para que possa ser simulado no ambiente do *Simulink*. No *Simscape* a montagem importa características como massa, inércia e localização do centro de gravidade automaticamente do modelo 3D, bem como suas restrições.

5.2 MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi feito um protótipo de bancada de testes, sendo esta com apenas um grau de liberdade. Para a verificação e validação dos dados, primeiramente foi construído o modelo da bancada no software de simulação *SolidWorks*, contendo todas as restrições necessárias para a montagem física do protótipo, como mostra a Figura 16 abaixo.

O modelo selecionado foi feito usando alumínio 6063-T5, sendo este fixado em uma estrutura rígida capaz de suportar a força exercida pelo motor em funcionamento. A estrutura possui uma haste principal, cujo comprimento total é de 60 centímetros. Nela foi posto Esc, motor, hélice de características compatíveis, juntamente com um sensor de vibração capaz de mostrar as variações deste fenômeno na bancada. Para que houvesse um controle da velocidade do motor, usou-se a placa Arduino Uno programado para que a potência do motor fosse aumentada em 2,67% a cada 3 segundos, até que 60% da potência fosse atingida, para a obtenção da rotação da hélice o tacômetro digital foi utilizado. A Figura 17 mostra a posição desses componentes na bancada.

As Figura 18a e 18b apresentam o modelo desenhado no *SolidWorks*. Na Figura 19 tem-se o esquema do modelo exportado ao *Simscape*.

Figura 16 – Ilustração da montagem da bancada experimental no *SolidWorks*, a mesa está fora de escala, sendo considerado apenas como ponto de apoio fixo.

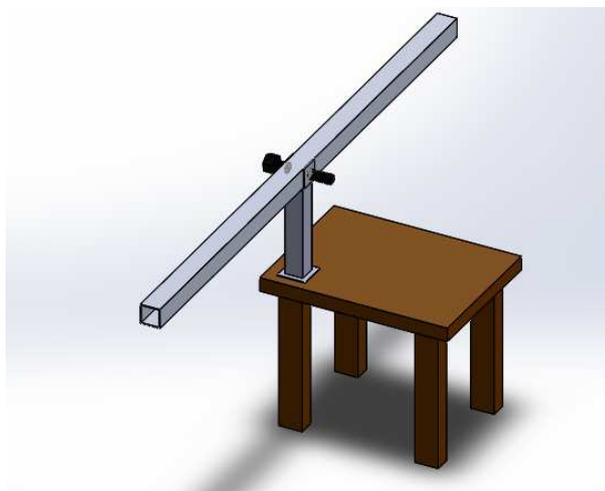
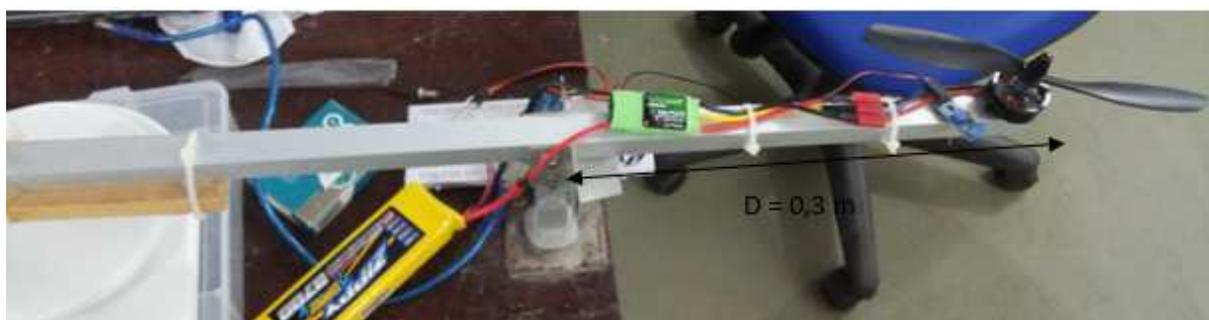


Figura 17 – Montagem da bancada de teste.



5.3 EXPERIMENTOS E CÁLCULOS

Para os cálculos, utilizou-se o método de alavanca para obter um controle adequado do comportamento dinâmico dos quadricópteros (SILVA; CORDEIRO, 2011).

O princípio da alavanca consiste em uma barra rígida, que ao sofrer ação de forças, é capaz de rotacionar ao redor de um eixo horizontal fixo. As alavancas são compostas por três elementos: o eixo, o peso e a força. A distância entre o peso colocado e o eixo é chamado de distância de resistência. E a distância entre o ponto da força e o eixo é chamado de braço de força (ASSIS, 2008).

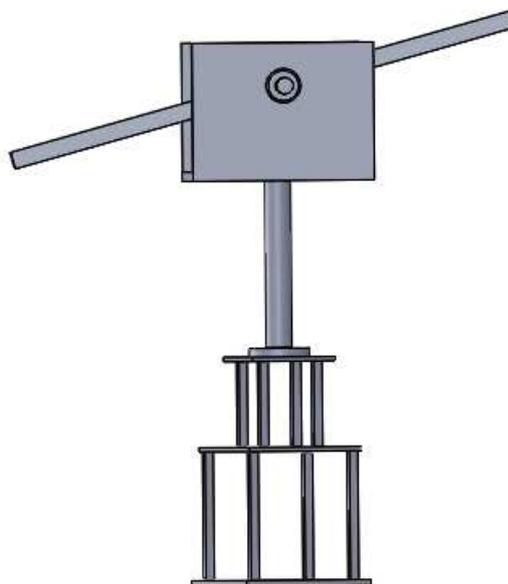
O conceito de torque ou momento é o produto da força vezes a distância desde seu ponto de ação até o eixo. Dessa forma tanto a magnitude da força, quanto comprimento do braço interferem na quantidade de torque gerado (COSCARRELLI, 2011).

A disposição das forças sobre o braço da alavanca pode proporcionar diferentes vantagens. A vantagem mecânica de uma alavanca é dada pela razão entre o braço de força e o braço de peso. Quando a vantagem mecânica é igual a um, diz-se que a força necessária para movimentar uma resistência é igual a própria resistência (COSCARRELLI,

Figura 18 – Representação da bancada no *SolidWorks*. (a) Vista frontal do Modelo 3D da bancada de teste; (b) Vista lateral do Modelo 3D da bancada de teste.



(a)

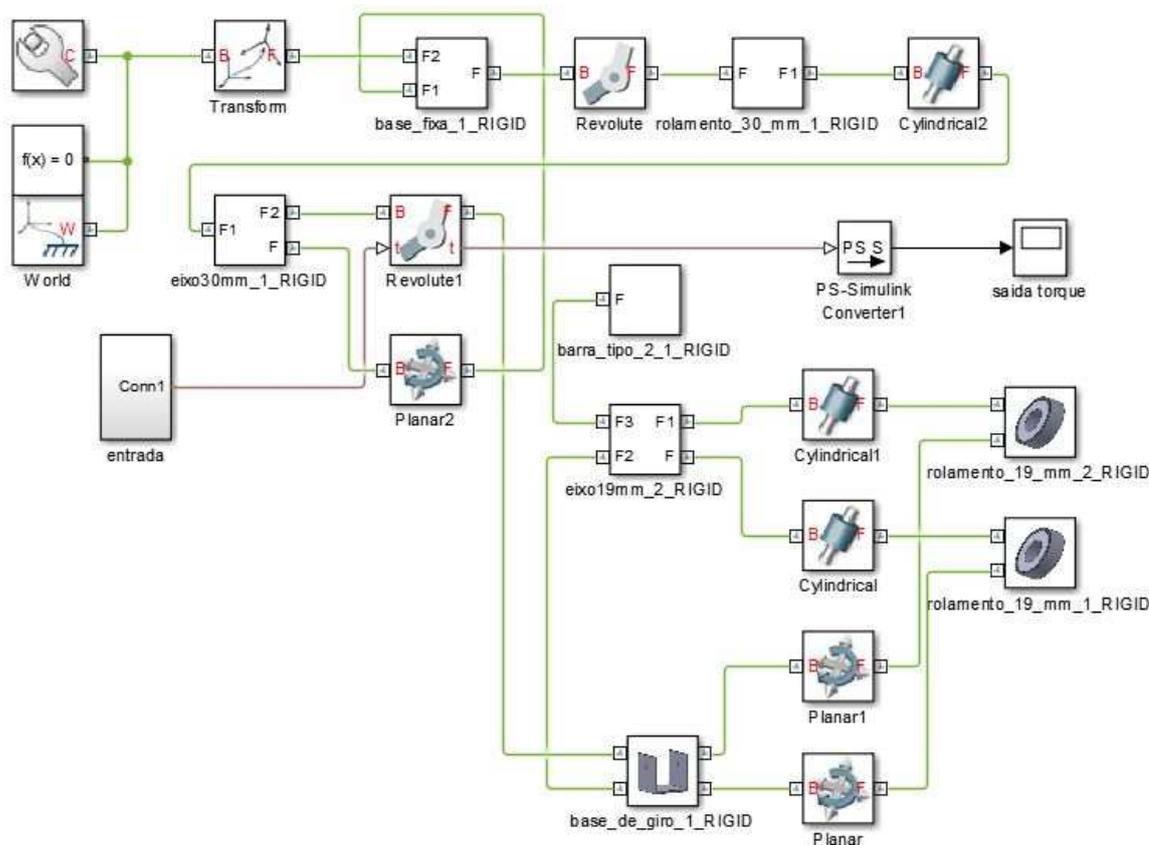


(b)

2011).

A alavanca feita no experimento possui vantagem mecânica igual a um, para que

Figura 19 – Representação da bancada no Simscape.



quando o propulsor for acionado e gerar uma força, possa ser medido com uma balança, em sua extremidade oposta, o peso imprimido pela barra. O empuxo gerado pelas hélices da aeronave é um fator determinante sobre sua eficiência, pois com o aumento da velocidade de rotação das hélices, obtém-se menor pressão sobre elas e gerando a força de empuxo. E conforme essa força de empuxo fica maior, menor ou igual ao peso da aeronave, faz com que a aeronave suba, desça ou fique flutuando (SILVA; CORDEIRO, 2011).

Com base nesses conceitos, encontrou-se o empuxo (F_{em}) e o torque (T) através Equação 5.1 e Equação 5.2, respectivamente:

$$F_{em} = m * g \tag{5.1}$$

$$T = F_{em} * D \tag{5.2}$$

Onde g é a aceleração da gravidade, adotada 9,81 m/s, e D é a distância medida do ponto de fixação da sua haste na base à sua extremidade, sendo igual a 0.3m, conforme mostrado na Figura 17.

Ao exportar a montagem do *SolidWorks* para o *Simscape*, a mesma foi dividida em blocos, cada um representando um elemento e seus respectivos posicionamentos e restrições, como mostrado na Figura 19.

No *SolidWorks* foi inserido o torque máximo obtido experimentalmente para analisar a vibração da bancada. Foram obtidas as rotações de 40% a 60% de potência do motor, com variação de 5%, utilizando um tacômetro digital, e através de interpolação foi possível estimar as rotações para outros valores de variação da potência.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A execução dos experimentos resultou na medição de duas variáveis, são elas: potência do motor, massa em kg obtida na balança, para que seja calculado a força de empuxo (N) e torque (N.m). Todos esses parâmetros tornam-se importantes para análise do rendimento das hélices utilizadas.

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados das médias de 3 testes das hélices de 8x4.5” e 10x4.5”, respectivamente. Até 34,67% de ambas as hélices não são geradas forças e não há vibração, por esse motivo as tabelas abaixo iniciam em 37,33%.

Tabela 2 – Dados dos Testes Realizados com a Hélice 8x4.5”

HÉLICE 8x4.5”		
% da Potência do Motor	Empuxo (N)	Torque (N.m)
37.33	0.09156	0.027468
40	0.45453	0.136359
42,67	0.81096	0.243288
45,33	1.48131	0.444393
48	1.84428	0.553284
50,67	2.31189	0.693567
53,33	2.75334	0.826002
56	3.12285	0.936855
58,67	3.48255	1.044765
60	3.64605	1.093815

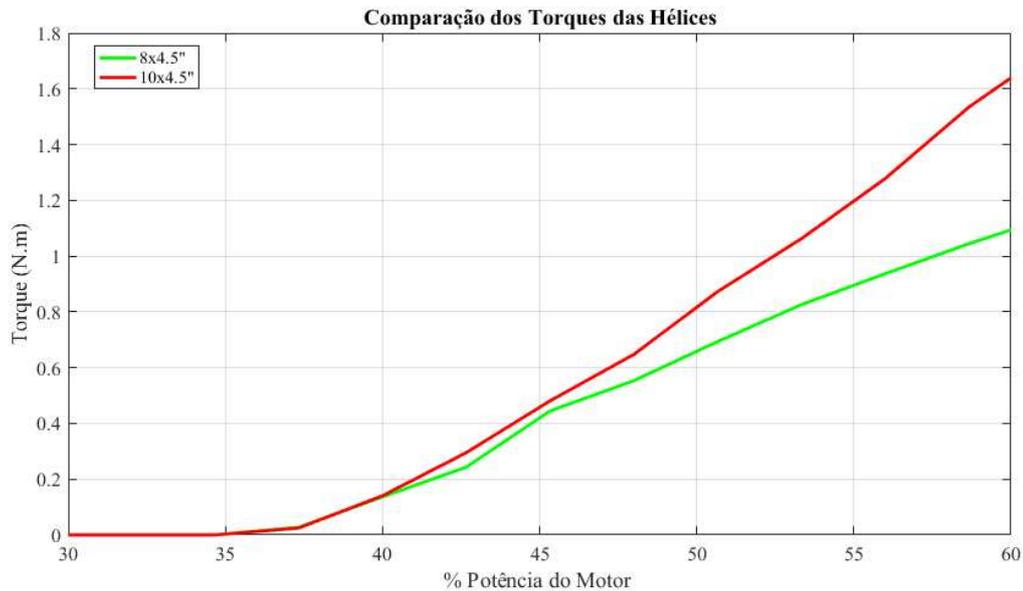
Tabela 3 – Dados dos Testes Realizados com a Hélice 10x4.5”

HÉLICE 10x4.5”		
% da Potência do Motor	Empuxo (N)	Torque (N.m)
37.33	0.08175	0.024525
40	0.4671	0.140283
42.67	0.98427	0.295281
45.33	1.6023	0.48069
48	2.1582	0.64746
50.67	2.9103	0.87309
53.33	3.54141	1.062423
56	4.26081	1.278243
58.67	5.11755	1.535265
60	5.46417	1.639251

A Figura 20 mostra graficamente a comparação dos torques gerados pelas hélices 10x4.5” e 8x4.5”. Até aproximadamente 40% da potência do motor ambas as hélices

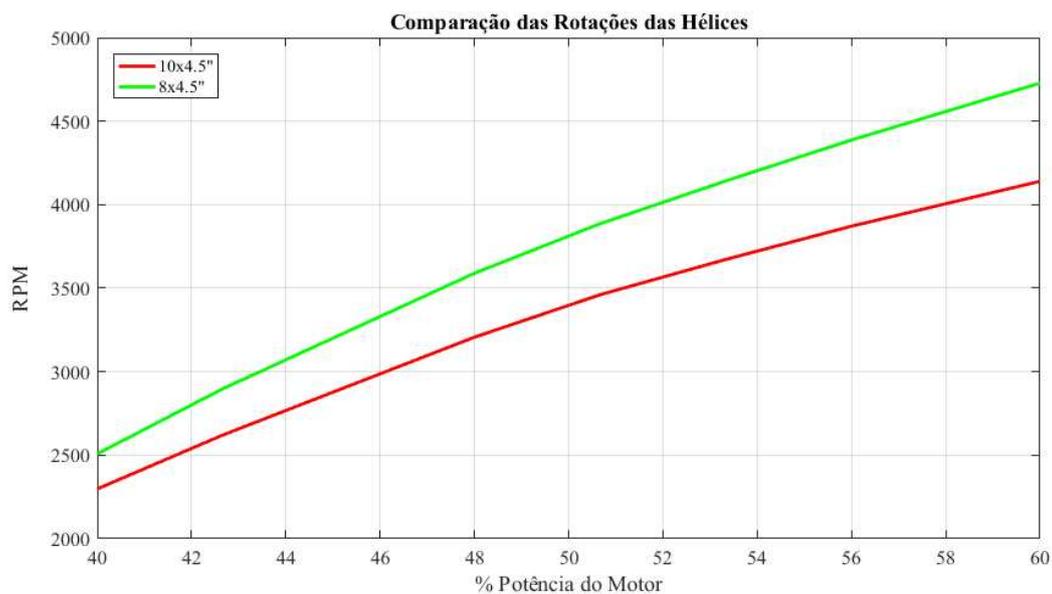
apresentam valores de torque semelhantes. Ao atingir 60% da potência do motor, o torque gerado pela hélice de maior diâmetro, representada no gráfico pela cor vermelha, tem torque igual a 1.6 N.m, enquanto o torque gerado pela menor hélice é de 1.1 N.m.

Figura 20 – Gráfico comparativo entre os torque gerados pelas hélices 10x4.5” e 8x4.5”.



Na Figura 21 é possível observar a comparação das rotações por minuto de cada hélice.

Figura 21 – Gráfico comparativo entre as rotações por minuto das hélices 10x4.5” e 8x4.5”.



Analisando o gráfico da Figura 20 e as Tabelas 2 e 3, verifica-se que a hélice 8x4.5” precisa atingir maiores rotações para alcançar o mesmo torque e empuxo da hélice de

maior diâmetro. Desta forma, as hélices 10x4.5" são mais indicadas, pois para uma mesma voltagem esta possui uma força maior, garantindo maior estabilidade ao quadricóptero. No entanto, a hélice 8x4.5" alcança maiores rotações. Dessa forma, entende-se que o torque e o empuxo são diretamente proporcionais ao diâmetro da hélice e inversamente proporcionais às rotações.

De acordo com o site da *MathWorks* (MATHWORKS, 2017), ao exportar um arquivo de CAD para o *Simscape Multibody*, é gerado um arquivo de descrição de múltiplos corpos XML, contendo a estrutura da montagem e os parâmetros que definem cada peça da montagem. Para que esse procedimento seja feito é necessário instalar um *plug-in*, disponibilizado pela *MathWorks*, para transformar a montagem em arquivo XML.

Na Figura 22 tem-se os resultados, no *Simscape*, dos torques das duas hélices.

O comportamento observado nos gráficos acima são semelhantes aos obtidos experimentalmente, levando em consideração as restrições, o material utilizado e a vibração apresentada ao realizar os testes. Nos resultados simulados, obteve-se como torque máximo para as hélices de 10x4.5" e 8x4.5" aproximadamente 1.1 N.m e 0.8 N.m, respectivamente, no segundo 60. Enquanto nos testes experimentais, para a hélice de 10x4.5 o torque máximo foi de aproximadamente 1.6 N.m e para a hélice de 8x4.5" o torque máximo experimental igual 1.1 N.m na simulação esses valores só foram atingidos com 10 segundos a mais.

Durante os testes foi possível observar vibrações, com isso preocupou-se em analisar a amplitude e verificar uma possível interferência, tendo em vista que vibrações podem, além de gerar ruídos nas leituras dos resultados, causar falhas relacionadas a fadiga,

Figura 22 – Gráfico comparativo entre os torques gerados pelas hélices 10x4.5" e 8x4.5" obtido no *Simscape* .

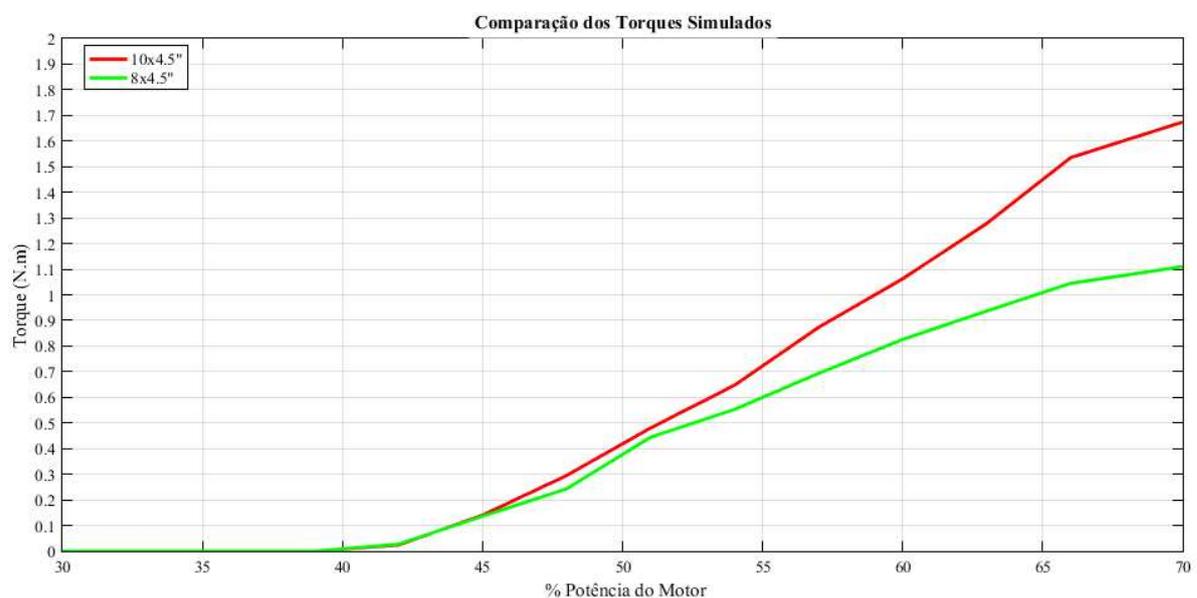
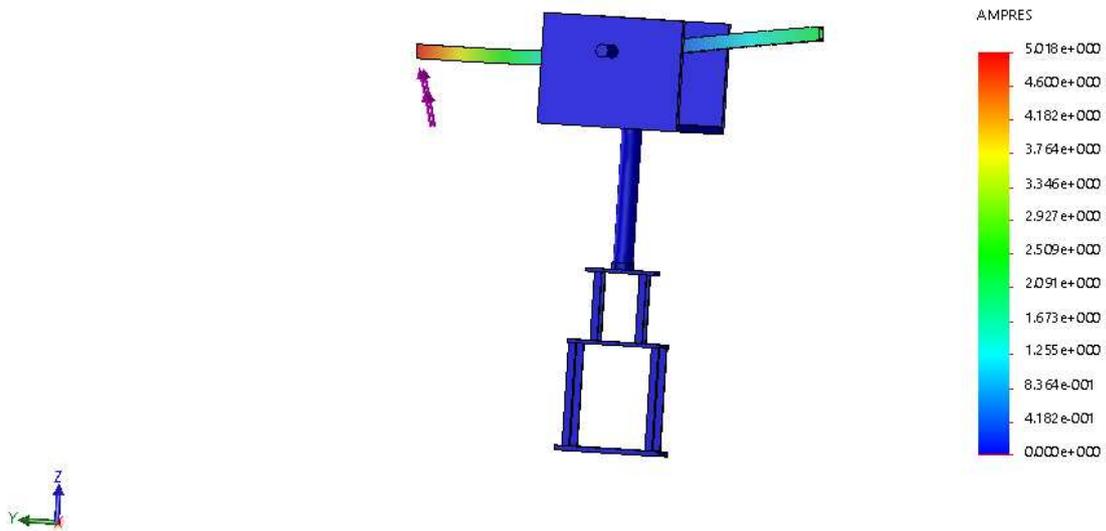


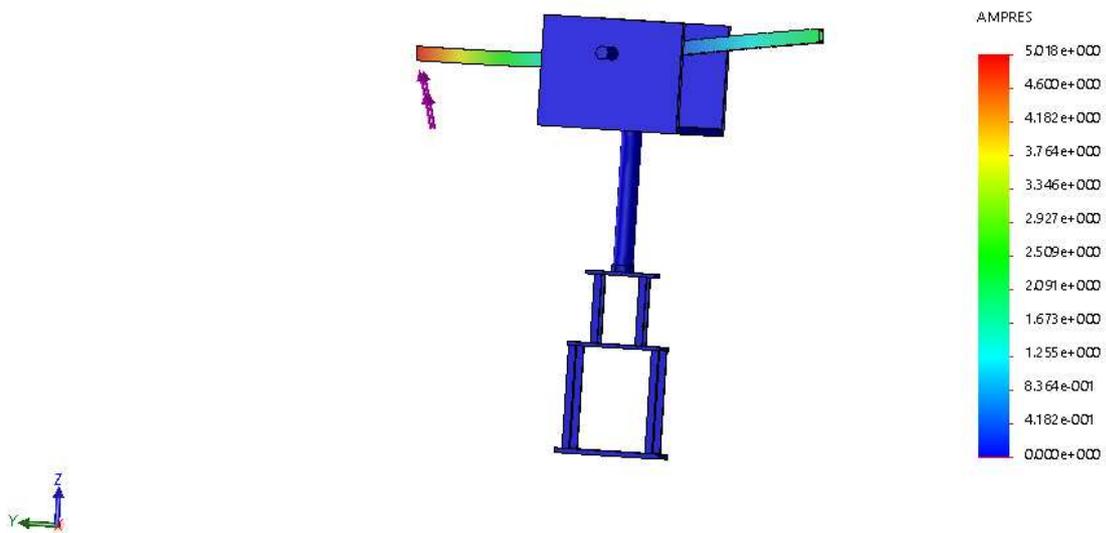
Figura 23 – Resultado da Simulação da Vibração no *SolidWorks* para o torque máximo: (a) da hélice 8x4.5". (b) da hélice 10x4.5".

Nome do modelo:projeto00k
 Nome do estudo:Frequência{Valor pre determinado-}
 Tipo de plotagem: Frequência Amplitude1
 Forma modal : 1 Valor = 174,44 Hz
 Escala de distorção: 0,0136496



(a)

Nome do modelo:projeto00k
 Nome do estudo:Frequência{Valor pre determinado-}
 Tipo de plotagem: Frequência Amplitude1
 Forma modal : 1 Valor = 174,43 Hz
 Escala de distorção: 0,0136496



(b)

desgaste mais rápido de materiais ou afrouxar e elementos de fixação como porcas (RAO, 2008). Para visualizar o efeito da vibração das hélices na estrutura, simulou-se o máximo

torque obtido nos testes realizados para ambas as hélices no SolidWorks. Os resultados das simulações para as hélices 8x4.5” e 10x4.5” podem ser observado nas figuras 23a e 23b, respectivamente.

De acordo com a simulação no *SolidWorks*, ao inserir o torque máximo em uma das extremidades, simulando o que acontece quando liga-se o motor, para ambas as hélices em seus respectivos valores de máximo torque o valor de vibração em Hz seria de aproximadamente 174 Hz.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de uma área relativamente recente, nota-se o crescimento dos estudos e desenvolvimento científico e tecnológico de veículos aéreos não tripulados. A construção desse tipo de veículo não é simples, pois envolve diversos aspectos tais como *hardware*, *software*, utilização de sensores e o consumo de energia. A falha de um desses elementos pode acarretar em acidentes, gerando prejuízos financeiros ou até mesmo colocar vidas em risco.

Percebe-se que há um horizonte de possibilidades de aplicações, contudo para se obter uma performance satisfatória, é necessário que todo o conjunto esteja harmônico. A escolha adequada do sistema propulsor é um dos fatores mais relevantes de acordo com publicações de autores da área.

Neste trabalho foi dividido em duas etapas: a construção da bancada para a realização e coleta de dados, e a modelagem computacional do sistema para simulação. O trabalho apresenta comparações entre os resultados obtidos experimentalmente em bancada e os resultados simulados, a fim de validar a bancada experimental construída. Nota-se que os resultados referentes ao torque são semelhantes. Portanto, a bancada apresentada torna-se válida para análise deste parâmetro, dentro das especificações do projeto.

Com os resultados positivos apresentados pela bancada e pela simulação, pretende-se para trabalhos futuros: proposta para trabalhos As próximas etapas de desenvolvimento incluem o aperfeiçoamento da simulação 3D e análise do comportamento da bancada para mais propulsores.

- Adaptação da bancada de testes para mais propulsores;
- Aperfeiçoamento da simulação 3D, para que a análise da vibração seja feita no próprio *Simscape*;
- Implementação da bancada com sensor de vibração, para comparar a com a simulação;
- Melhorar o método de aquisição de dados, para que os valores da balança sejam enviados diretamente para o MATLAB.

O presente trabalho culminou na publicação de artigo completo no XXIV Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM 2017, sob o título *Analysis and mathematical modeling of the electric thrust system of a quadcopter to obtain flight performance criteria*.

REFERÊNCIAS

- ALCOA. *Ligas e Têmperas de Extrusão*. [S.l.], 2010. 52 p.
- ALVES, A. S. C. et al. Estudo e aplicação de técnicas de controle embarcadas para estabilização de voo de quadricópteros. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2012.
- ANAC. *Orientações Aos Usuários De Drones*. 1^a. ed. Brasília/DF, 2017. 24 p.
- ASSIS, A. K. T. *Arquimedes, o centro de gravidade ea lei da alavanca*. [S.l.]: Apeiron Montreal, 2008. Pág. 168.
- BARROS, J. L. d. M. *Projeto de um Veículo Aéreo Não Tripulado Modelo Multicóptero*. 2014. Universidade Estadual do Maranhão. São Luís. 2014.
- BELHOT, R. R. s, figueiredo e c. o, malavé (2001). *O Uso da Simulação no Ensino de Engenharia*, 2001.
- BEZERRA, B. C. *Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para mapeamento da saúde de vegetações*. 2015. Departamento de Engenharia Mecânica, PUCRJ (Pontifia Universidade Católica do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, Brasil.
- BÜCHI, R. *Fascination Quadcopter: Edition 2016/2017*. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2016.
- CBMERJ. *Corpo de Bombeiros e DECEA discutem requisitos para uso dos drones*. 2016. Disponível em: <<http://www.cbmerj.rj.gov.br/institucional/item/14-corpo-de-bombeiros-e-decea-discutem-requisitos-para-uso-dos-drones>>. Acesso em: 14 novembro 2017.
- COSCARELLI, M. V. Métodos de treinamento de força i: Ciclo de alongamento encurtamento; alavancas e torque. 2011.
- COSTA, S. *Controlo e Simulação de um Quadrirotor convencional*. Tese (Doutorado) — MS thesis, Tech. Univ. of Lisbon. Lisbon, 2008.
- FILHO, G. L. S.; RUDIGER, G. T.; NASCIMENTO, J. P. M. D. Quadricoptero. 2011. Engenharia de computação.
- FOUR, R. D. et al. Operational characteristics of brushless dc motors. *The University of the West Indies St. Augustine, Trinidad*, 2007.
- FRACARO, N. et al. Veículos aéreos não tripulados (vants) do tipo multirrotor: Abordagem teórica e ênfase no estudo do quadrirrotor. *Salão do Conhecimento*, v. 3, n. 3, 2017.
- GAMAZO-REAL, J. C.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E.; GÓMEZ-GIL, J. Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 10, n. 7, p. 6901–6947, 2010.
- GÜÇLÜ, A.; ARIKAN, K. B. Attitude and altitude control of an outdoor quadrotor. *Atılım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Bölümü*, 2012.

- GUIMARÃES, M. P. Controle semiativo de vibrações por força de controle não linear. 2014.
- IAC. *Mecânico de Manutenção Aeronáutica: Grupo Motopropulsor*. [S.l.: s.n.], 2002. Divisão de Instrução Profissional.
- JORNAL DO BRASIL. *Drones ajudam operações do Corpo de Bombeiros*. 2016. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2016/02/26/drones-ajudam-operacoes-do-corpo-de-bombeiros/>>. Acesso em: 14 novembro 2017.
- MALDONADO J. C; BARRETO, R. S. *Veículos Autônomos Não Tripulados: Perspectivas e Desafios*. Porto Alegre, 2014. N. 24.
- MARTINEZ-ALVARADO, R. et al. Modeling and simulation of a propeller-engine system for unmanned aerial vehicles. In: IEEE. *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013 IEEE International Autumn Meeting on*. [S.l.], 2013. p. 1–6.
- MATHWORKS. *Export a SolidWorks Robot Assembly Model*. 2017. <https://www.mathworks.com/help/physmod/smlink/ug/export-robot-assembly-from-solidworks-software.html>. Acesso em: 28/07/2017.
- MATTIELLO, C. D. *Comparativo entre controlador pid e fuzzy no controle de atitude em um quadricóptero*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- NAIDOO, Y.; STOPFORTH, R.; BRIGHT, G. Quad-rotor unmanned aerial vehicle helicopter modelling & control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 4, p. 45, 2011.
- OST, A. Modelagem matemática do conjunto esc-motor-hélice de um vant utilizando identificação de sistemas. 2016.
- RAO, S. *Vibrações Mecânicas. Tradução de Arlete Simille Marques*. [S.l.]: São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- RIBEIRO, M. *Construindo um quadricóptero*. Disponível em: <<http://www.quad.marksr.com.br/>>.
- SÁ, R. C. *Construção, modelagem dinâmica e controle PID para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero*. Tese (Doutorado), 2012. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará.
- SILVA, J. V. D. C. et al. Revisão bibliográfica sobre modelagem caixa branca de hélices. *Salão do Conhecimento*, v. 3, n. 3, 2017.
- SILVA, K. L. da; MORAIS, A. S. de. Hardware para controle avançado de veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero. *Horizonte Científico*, v. 8, n. 1, 2013.
- SILVA, L. P. da; CORDEIRO, C. S. Quadricóptero, aspectos gerais e análises da propulsão elétrica. In: *VIII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. [S.l.: s.n.], 2011.
- XIA, C.-l. *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.